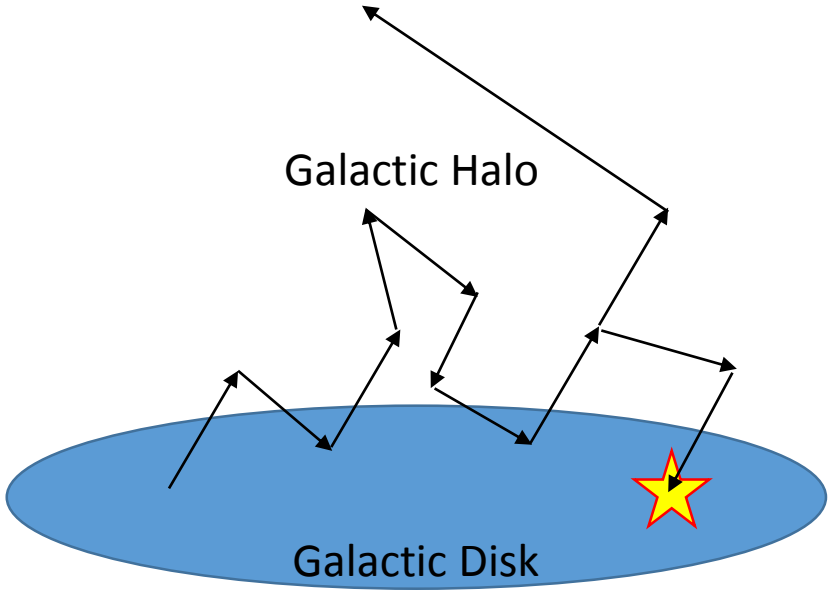
Удержание космических лучей в Галактике созданной ими турбулентностью с учетом нелинейного затухания Ландау

Д. Чернышов
А.В. Ивлев, В.А. Догель

Модель гало космических лучей



Вторичный / первичный (B/C)
Стабильный / нестабильный ($^{10}Be/^{9}Be$)

Время жизни КЛ в Галактике
Размер гало

- Время жизни зависит от энергии: не спутанная силовая линия (B/C)
- Рассеяние на неоднородностях магнитного поля
- Коэф-т диффузии велик – неоднородности можно считать МГД волнами: альвеновские волны

Модель гало космических лучей

- Почему коэфф-т диффузии именно такой?
- Почему размер гало именно такой?

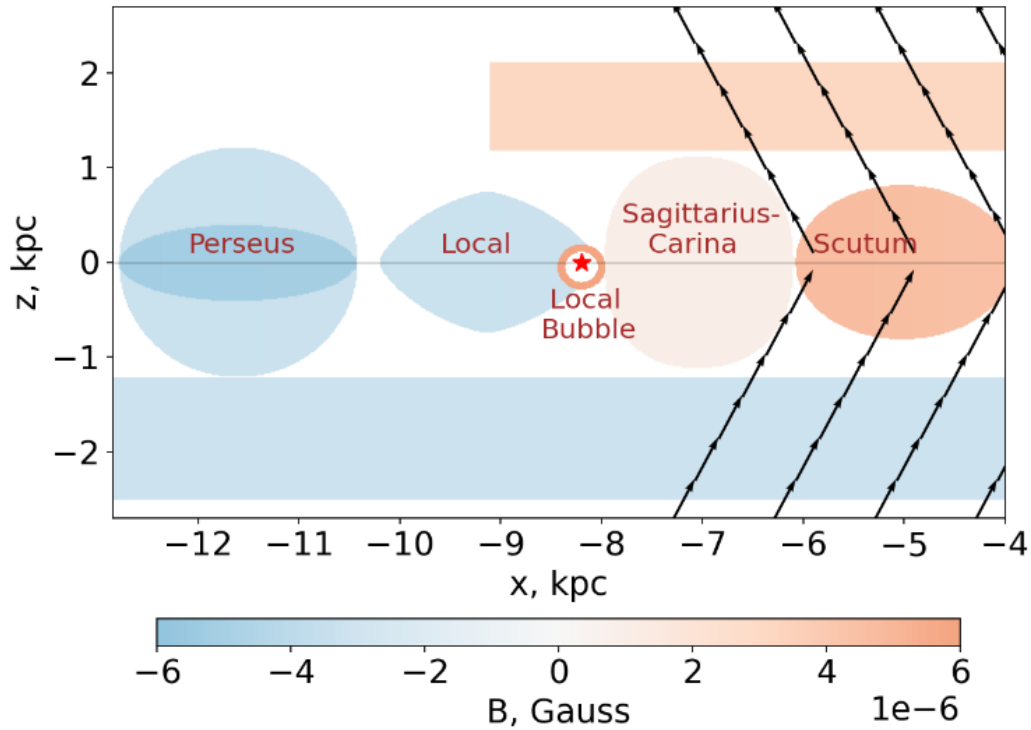
- Модели МГД-турбулентности гало
  - Источник МГД волн
  - Диссипация МГД волн

- Какой минимальный набор параметров необходим?

Модель гало космических лучей

- Источник МГД волн – сами космические лучи
- Диссипация:
  - Линейный режим. Полностью отсутствует: убегание + адиабатика (Dogiel+, 2023). Слишком маленькое гало!
  - Турбулентный каскад (Evoli+, 2018; Farmer&Glodreich, 2004)
  - Kinetic Alfven waves
  - Нелинейное затухание Ландау (Dogiel+, 1993; Ptuskin+, 1997)

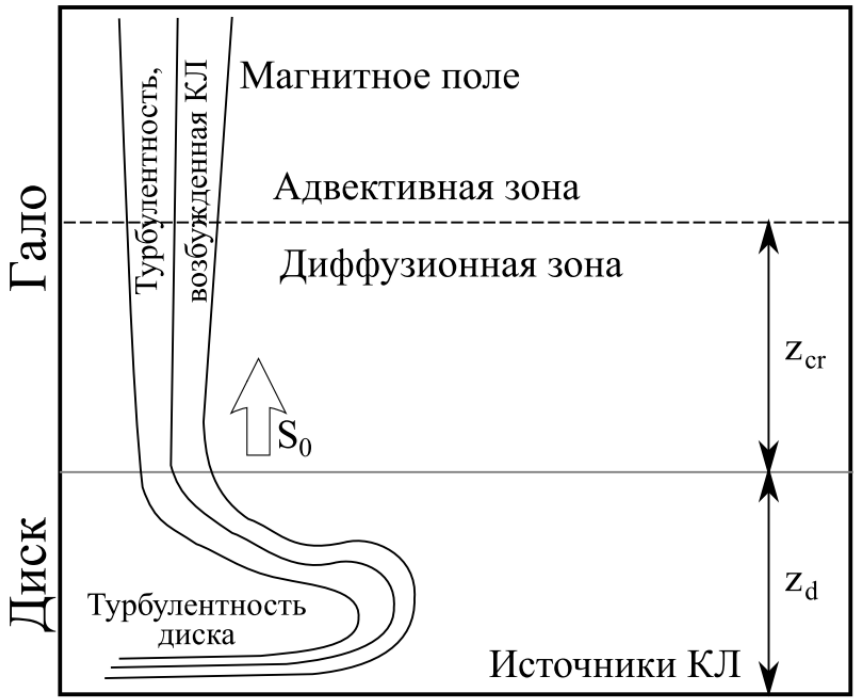
Магнитное поле Галактики



Korochkin+, 2025

- Нас интересует крестообразная компонента
  - $B \sim 1\ \mu\mathrm{G}$ и слабо меняется с высотой

Модель гало космических лучей



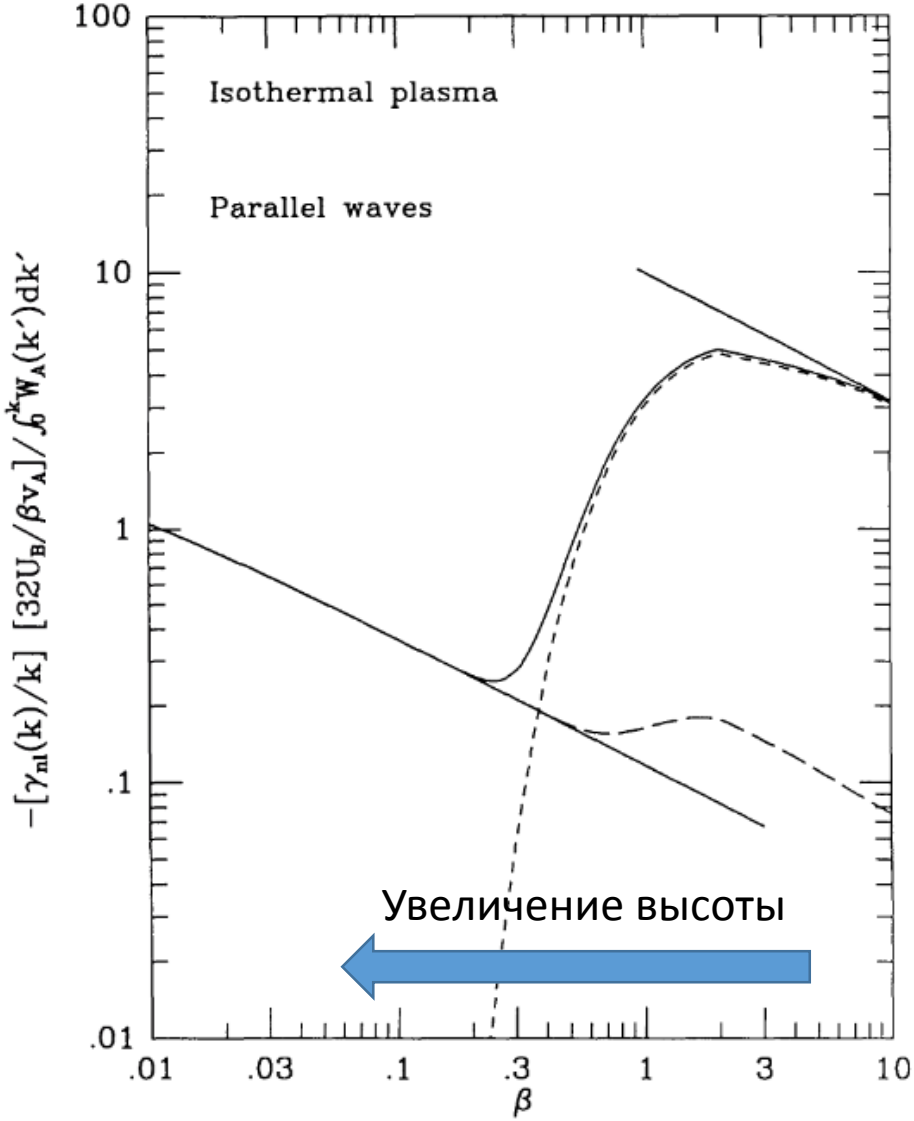
$$\frac{\partial}{\partial z}\left(u_{\rm adv}N - D\frac{\partial N}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{1}{3}\frac{du_{\rm adv}}{dz}pN - \dot{p}N\right) = 2Q(p)\delta(z)$$

$$\frac{\partial v_{\rm A}W}{\partial z} - \frac{du_{\rm A}}{dz}\frac{\partial kW}{\partial k} = (\Gamma_{\rm CR} - \nu_{\rm NL})W$$

- Нет поперечной диффузии
- Магнитное поле считаем вертикальным (НО: неопределенность n(z), T(z))
- Распространение в диске упрощаем до однородного распределения (см B/C)

$$Q(p) \propto p^{-2.3}$$

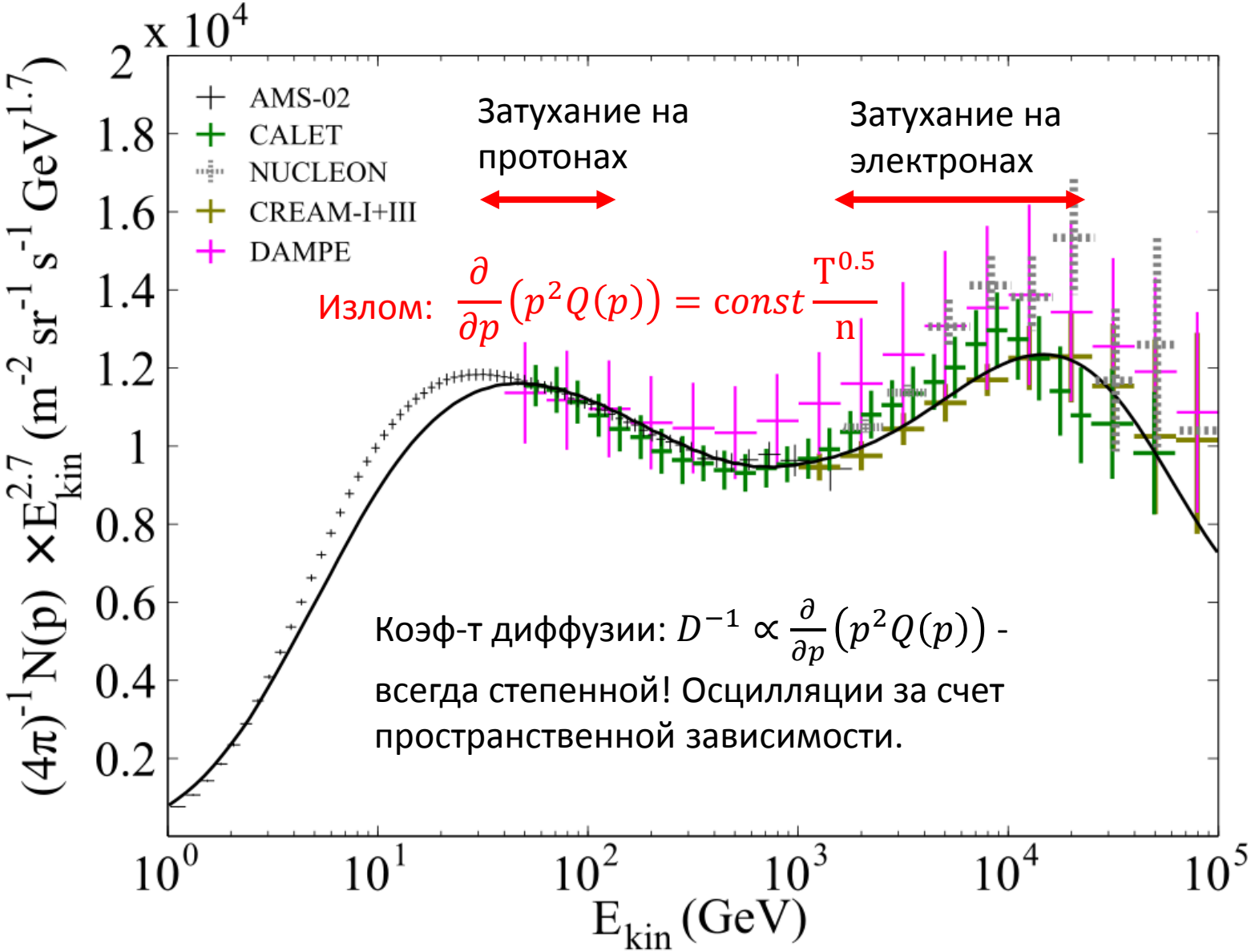
Нелинейное затухание Ландау



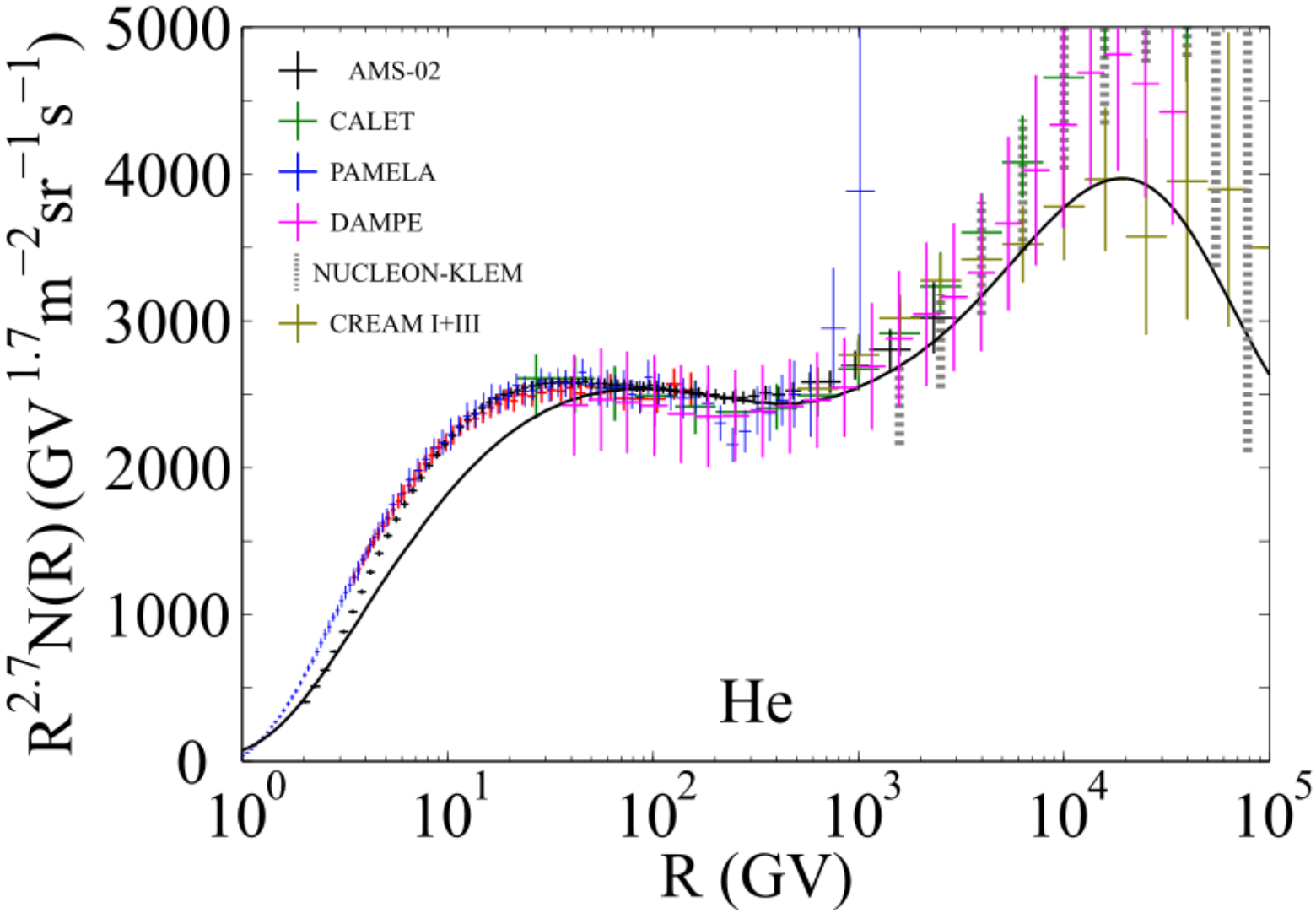
- Инкремент затухания состоит из двух частей:
  - Затухание на протонах (большие β)
  - Затухание на электронах (малые β)
- β падает с высотой (и, соответственно, с энергией КЛ)

(Miller, 1991)

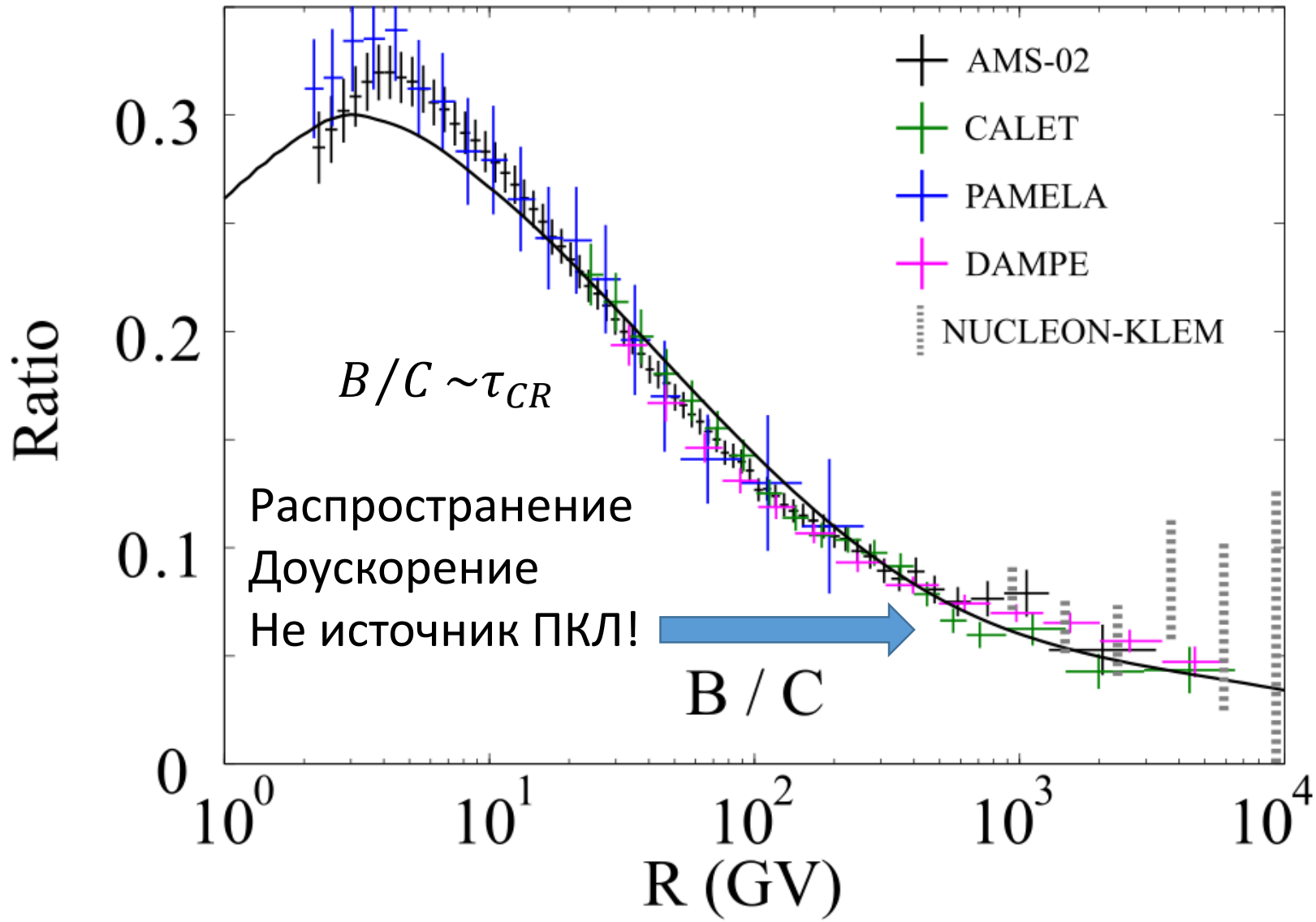
Протонная компонента



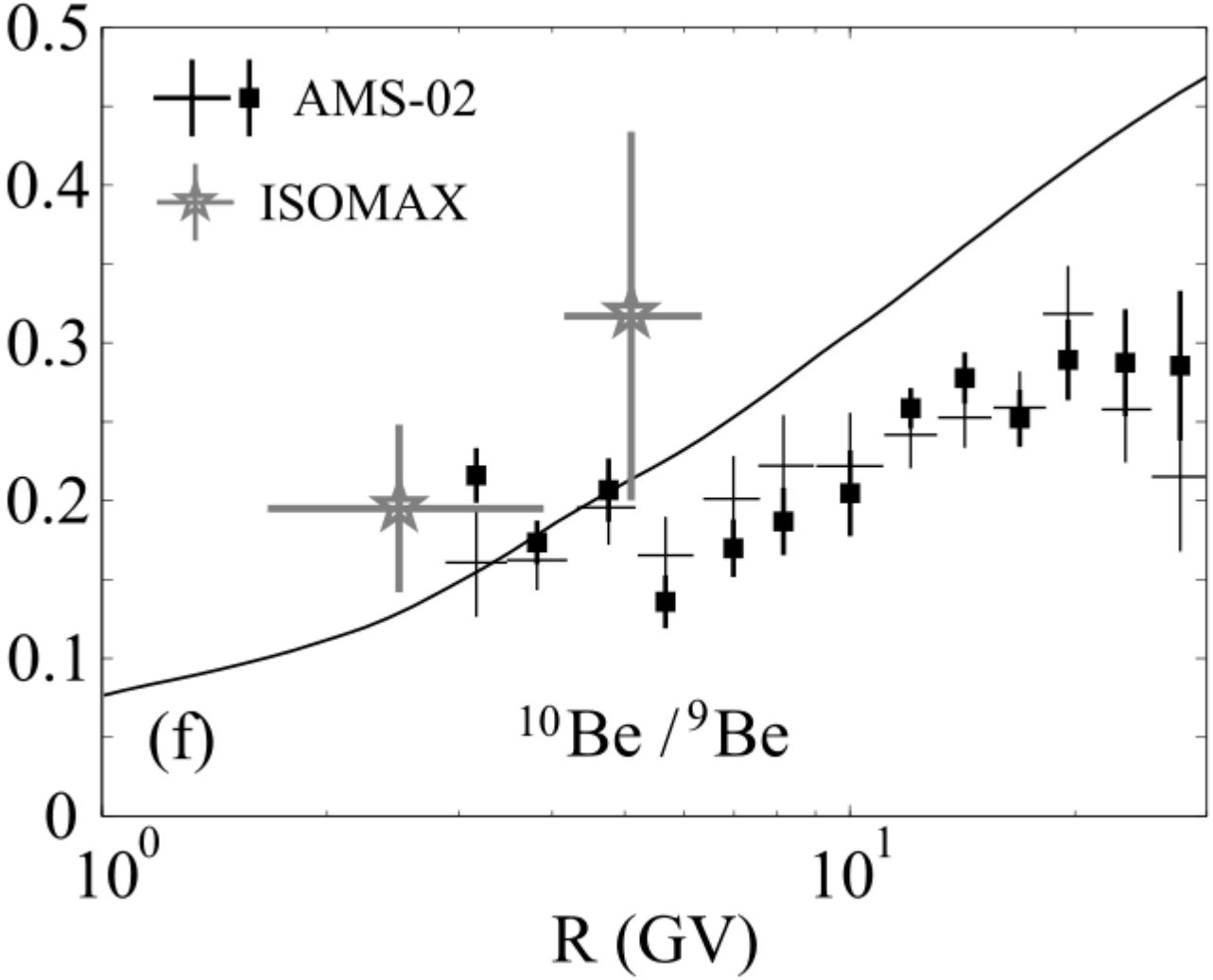
Гелий


AMS-02
CALET
PAMELA
DAMPE
NUCLEON-KLEM
CREAM I+III
He
$R^{2.7}N(R)\,(GV^{1.7}m^{-2}sr^{-1}s^{-1})$
R (GV)
0
1000
2000
3000
4000
5000
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
10^5

B/C


AMS-02
CALET
PAMELA
DAMPE
NUCLEON-KLEM
Ratio
0.3
0.2
0.1
0
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
R (GV)
$B/C \sim \tau_{CR}$
Распространение
Доускорение
Не источник ПКЛ!
B / C

Нестабильные изотопы



Отношение падает с высотой гало (e.g.: Evoli 2020)

«Высота» гало:
2 кпк на 1-10 ГВ
> 6 кпк на > 100 ГВ

Выводы

- Мы показали, что одной лишь потоковой неустойчивости КЛ вместе с нелинейным затуханием Ландау достаточно, чтобы описать спектры КЛ у Земли
- Модель недооценивает эффективный размер гало – можно исправить наклоном силовых линий
- Дефицит КЛ на низких энергиях – следствие пренебрежением диффузией в диске (и тороидальной компонентой B)